

令和 6 年 6 月 4 日現在

機関番号：12605

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03977

研究課題名（和文）環境危険度の構造化に基づく自動運転のリスクレジリエンスコントロールの基盤構築

研究課題名（英文）Fundamental Study on Risk Resilience Control for Autonomous Driving Based on Driving Environmental Risk Structuration

研究代表者

ポンサトーン ラクシンチャラーンサク（Raksincharoensak, Pongsathorn）

東京農工大学・工学（系）研究科（研究院）・教授

研究者番号：30397012

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、事故予防・早期回避のための自動運転技術として、走行環境・道路文脈から数秒先の予測危険度をリスクポテンシャルで記述し、リスクを最小化するための規範運転を決定し、安全な走行へ誘導するリスクレジリエンスコントロールの基盤研究を行った。具体的には、実路走行環境の走行データから周辺車両、歩行者等の行動・ふるまいをモデル化し、リスクポテンシャル法に基づき規範経路・速度モデルを算出する運動計画・制御システムを構築した。次に第二ステップでは、道路交通文脈情報に適合した速度計画手法を考案し、その有効性を検証した。リスクレベルを合理的に推定するための車両運動制御系の設計指針を示すことができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題は、従来の自動車運動力学・制御による物理モデルに加え、交通環境リスクの多様性に対応可能な情報科学モデルを融合させて、サイバーフィジカルシステムとして事故予防メカニズムを学術的に見出すものであり、交通事故ゼロに対する学術的研究である。また、自動車以外のモビリティを設計する上でも安全指針になりうる応用範囲の広い研究であり、社会的な波及効果も大きいと考える。

研究成果の概要（英文）：This research aims to construct an automated driving technology for accident prevention and early avoidance, focusing on a fundamental research on risk resilience control methodology, which enables the risk level prediction in next few seconds ahead based on the driving environment and road context using risk potentials. The model determines normative driving to minimize risk, and guides the driver to safe driving behavior. Specifically, a motion planning and control system was constructed in the way that the behavior of surrounding vehicles, pedestrians, etc. are modeled based on driving data from the actual road driving. The control system calculates a trajectory and speed model based on the risk potential. Next, in the second step, a speed planning method adapted to road traffic context information was devised and its effectiveness was verified. This fundamental research aims to provide design guidelines for vehicle motion control systems to reasonably estimate the risk level.

研究分野：機械力学・制御工学

キーワード：モビリティ 運動制御 予防安全 自動運転

## 様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

交通事故をゼロにする自動運転は安全・安心な自動車社会の実現に欠かせない技術である。日本の交通事故による死亡事故件数は 2019 年になり 3,500 名以下で減少傾向にあるものの、市街地で 65 歳以上の高齢運転者による第一当事者の割合は年々増加しており、悲惨な重大事故が多発している。特に、市街地道路の歩行者・自転車衝突事故および見通しの悪い交差点の出会い頭事故を削減することは喫緊の課題である。市街地道路での交通安全の問題は、先進諸国に留まらず、今後急激に自動車の普及が進む新興国でも同様な傾向にある。日本は課題解決先進国として、新しい科学的アプローチを提示する責務があり、本研究の意義が高い。

交通事故を未然に防止する予防安全技術の中で、通常走行時に対応する車間距離制御および車線維持制御および緊急時に対応する衝突回避自動ブレーキシステムは成熟され、既に実用化されている。しかしながら、陰から歩行者などが急出現するような突発的な事象では、現行の予防安全は対応できない場合がある。もし事故リスクが高まる前に自動運転技術で早く安全な状態に復帰させること(リスクレジリエンス)ができれば、重大事故を未然に防止することができる。この課題に対して申請者はこれまで、危険度が顕在化する前に、熟練者の先読みリスクポテンシャル運転モデルを内蔵した高度運転支援システムを提案してきた。本研究課題の核心をなす学問的問いは、車載センサで直接検知できないリスクをどのように走行環境の文脈から定量的に推定し、走行環境危険度に対してどのように構造化し、知能をもった知識ベース(Knowledge-Based)の自動運転をどのように設計すればいいかという点である。

### 2. 研究の目的

本研究では、事故予防・早期回避のための自動運転技術として、環境認識部によって取得した走行環境・道路文脈から数秒先の予測危険度をリスクポテンシャルで記述し、リスクを最小化するための規範運転を決定し、安全な走行へ誘導するリスクレジリエンスコントロール(Risk Resilience Control)の基盤研究を行う。

申請者は人間と自動運転システムの協調運転、シェアード・コントロール(Shared Control)の設計概念に注目する。道路環境危険度をリスクレベルとして理論的に定量化し、そのリスクレベルに適応した統合安全制御、リスクレジリエンスコントロール(Risk Resilience Control)の設計基盤を構築する。

本研究課題は、従来の自動車運動力学・制御による物理モデルに加え、交通環境リスクの多様性に対応可能な情報科学モデルを融合させて、サイバーフィジカルシステムとして事故予防メカニズムを学問的に見出すものであり、交通事故ゼロに対する学問的研究である。

### 3. 研究の方法

3年間の研究期間で研究目的を達成するための実施内容は以下の通り。

- (1) 交通環境危険度（リスク）の定量化・構造化
- (2) リスクレジリエンスコントロールの設計
- (3) リスクレジリエンスコントロールの効果検証

#### 4. 研究成果

本研究では見通しの悪い交差点での自転車と自動車の出会い頭を対象にして、ビッグデータの活用による潜在的な危険箇所の解消を目的とした。具体的にはタクシーのドライブレコーダデータを用いた機械学習を実施し、交通文脈から飛び出しを予測する「熟練ドライバ」を模擬したドライバモデルの構築を目指した。そのドライバモデルに基づくリスク予測型減速支援システムを設計した。

ドライバモデルでは、天候、時間帯、車線数、歩行者数などの走行シーンを基に、出会い頭の飛び出しを予測する性能が求められる。そこで本研究では、経験豊富なドライバに着目した。経験豊富なドライバは、直面した状況を過去の経験に当てはめて、次に何が起こるかを予測して、速度の調整を行う。ここで社会実装面を考慮すると、運転指導員の運転行動を網羅的に収集するのは現実的ではない。そこで本研究では、タクシーから採取したドライブレコーダのデータを用いた。東京農工大学スマートモビリティ研究拠点では、ヒヤリハットデータベース（以下 HHDB）を運用している。これはタクシーのドライブレコーダから採取した、ヒヤリハット事象の映像データと物理データに分析者がタグ情報を付加したデータである。本研究ではさらに走行シーンを特徴づける計 12 項目（走行エリア、通行区分、歩道形態、交差点形状、車線数、横断歩道有無、駐車車両数、歩行者数、交通量、先行車有無、時間帯、天候）の情報を紐づけた。

次にドライバモデルで予測したい指標について述べる。自転車の飛び出し予測はドライバの心理そのものであり、HHDB から具体的な数値を求めることは困難である。そこで今回は、車両の物理的な挙動は、ドライバが感じ取った飛び出し確率に起因する結果と仮定して、間接的に車両の減速性能の余力度合  $\alpha$  で式(1)のように表現した。

$$\alpha = \frac{a_{max} - a_{req}}{a_{max}}$$
$$a_{req} = \frac{V_{car}^2}{2(D - V_{car}\tau)} \quad (1)$$

キーパラメータ  $\alpha$  は車両が発揮できる最大の減速力  $a_{max}$  に対して、衝突しないで停車するのに必要な減速力  $a_{req}$  を差し引いた「減速性能の余力分」がどの程度あるかを表す。なお、 $a_{req}$  は図 1 において自転車を認識した際の自車速  $V_{car}$ 、自転車との距離  $D$ 、反応時間  $\tau$  から幾何学的に算出される。

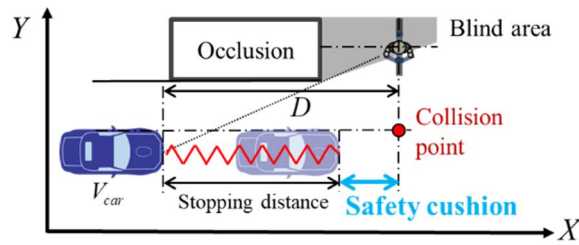


図1 無信号交差点の自転車飛び出しシーンのモデル

キーパラメータ  $\alpha$  は 1 に近づくと減速性能の余力が十分にあり，ドライバが飛び出し確率を高く推定し，飛び出しに備えている状態と表現できる．逆に， $\alpha$  が 0 の場合は減速性能の余力が全くない状態，すなわちドライバが飛び出しポテンシャルを低く見積もって運転していることと等価である．

今回ドライバモデルとしてニューラルネットワークを用いた．図 2 に代表的なニューラルネットワークの構造の例を示す．

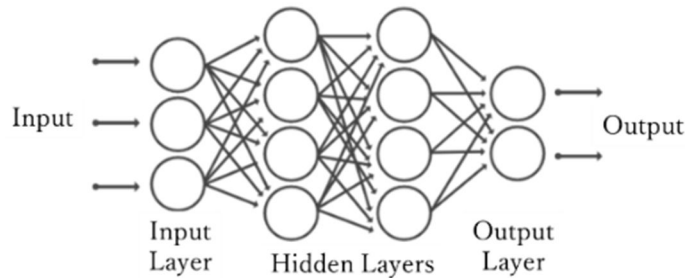


図2 ニューラルネットワーク

ニューラルネットワークは入力層，出力層，そしてそれらをつなぐ関数である 1 層以上の隠れ層から成り立つ．予測したいことの模範的な結果（目的変数）を出力層に，この模範解答の原因と考えられる情報（説明変数）を入力層に当てはめて，それらをつなげる隠れ層の最適な関数を算出することでニューラルネットワークを学習させる．未知な事象を予測する際は，この学習したニューラルネットワークに未知な事象の情報（説明変数）を入力することで，得たい結果（目的変数）を予測することができる．

今回のニューラルネットワークを構築する際の教師データでは，「人間の行動は変動性を含み，自転車利用者が関与するニアミスは回避しようがない」という前提を置いた．すなわち HHDB においてニアミス度合いが低かった事象データは，ドライバが適切な速度調整を行った結果として扱い，教師データに充てた．今回このニアミス度合いの指標としては式(2)で表現されるセーフティクッションタイム（以下 SCT）を用いた．

$$SCT = \frac{\left[ D - V_{car} \tau - \frac{V_{car}^2}{2a_{max}} \right]}{V_{car}} \quad (2)$$

SCT は先行研究でも用いられ，「衝突回避自動ブレーキがあと何秒遅れていたら，衝突が起きてしまうか」という，時間の次元で切迫度を定量化したものである(3)．本研究では

SCT 0.5 秒以上のニアミス度合いが低い事象を教師データとし，出力層に減速性能の余力度合（飛び出しポテンシャル） ，入力層にその に至った原因と考える走行シーンを当てはめて，その両者間をよく表現できる隠れ層を学習させた．学習手法はレーベンバーグ・マルカート法を用いたが，今回のドライバモデルでは社会実装の面から，未知のデータに対しての推定精度つまり汎化性能が最重要であると考えた．一般にニューラルネットワークの学習においてベイズ正則化を行うことで過学習が抑制され汎化性能を向上することができる．したがって，本研究ではレーベンバーグ・マルカート法のアルゴリズム内でベイズ正則化を行った学習をさせることで，「経験豊富な」ドライバモデルの構築を目指した．

次に，構築したドライバモデルの安全性を評価するためのシミュレーションを行った．今回教師データに用いなかった，ヒヤリハット度合いが高いデータ ( $SCT$  0.5 秒未満) をテストデータとして使用した．つまり， $SCT$  が 0.5 秒未満であったイベントのもとで，構築したドライバモデルを用いて，推奨される  $\alpha$  を算出し，この  $\alpha$  を満たすように減速支援を行ったと仮定したとき，どの程度  $SCT$  が向上するのかを調査した．結果は図 3 のようになった．

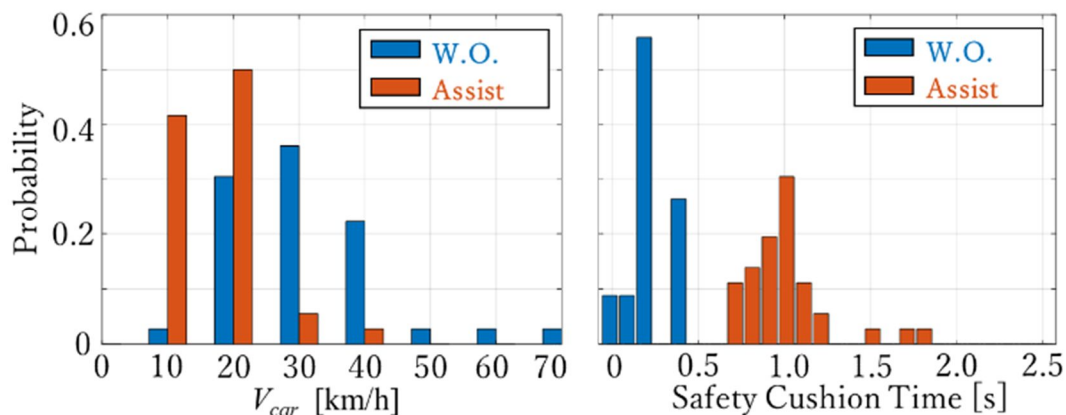


図 3 規範ドライバーモデルを用いた推奨通過速度およびそれに伴うセーフティクッションタイムの変化

図 3 より全てのデータで  $SCT$  0.5 秒以上に推移していることがわかるため，安全性能を確認できた．また対象とする HHDB における  $SCT$  の最大値が 2.5 秒であるため，これ以上の確保は過剰な安全性が考えられる．図 3 を見ると全てのデータが  $SCT$  2 秒以内に収まっていることから，過剰な安全性を確保するのではなく，円滑な交通も実現できる可能性を示していると考えられる．

上記のようなシステムをドライビングシミュレータに実装し，被験者実験によってシステムの安全性および受容性を確認した．その結果，提案したリスクレジリエンスコントロールによって，交差点進入時の速度が自動ブレーキ制御介入によって，適切に抑制され，被験者の受容性が確保できることを確認できた．

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Zhang Yan, Zhang Xingguo, Fujinami Yohei, Raksincharoensak Pongsathorn  | 4. 巻<br>12              |
| 2. 論文標題<br>Social Force Model-Based Adaptive Parameters Collision Avoidance Method Considering Motion Uncertainty of the Pedestrian | 5. 発行年<br>2024年         |
| 3. 雑誌名<br>IEEE Access   | 6. 最初と最後の頁<br>794 ~ 809 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1109/ACCESS.2023.3347779  | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）   | 国際共著<br>-               |

|  |                         |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Shen Xun, Zhang Yan, Zhang Xingguo, Raksincharoensak Pongsathorn, Hashimoto Kazumune | 4. 巻<br>4               |
| 2. 論文標題<br>Robust Optimal Braking Policy for Avoiding Collision With Front Bicycle             | 5. 発行年<br>2023年         |
| 3. 雑誌名<br>IEEE Open Journal of Intelligent Transportation Systems                              | 6. 最初と最後の頁<br>943 ~ 954 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.1109/OJITS.2023.3335397  | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）  | 国際共著<br>-               |

|   |                         |
|---|-------------------------|
| 1. 著者名<br>Zhang Yan, Shen Xun, Raksincharoensak Pongsathorn   | 4. 巻<br>35              |
| 2. 論文標題<br>Study on Collision Avoidance Strategies Based on Social Force Model Considering Stochastic Motion of Pedestrians in Mixed Traffic Scenario | 5. 発行年<br>2023年         |
| 3. 雑誌名<br>Journal of Robotics and Mechatronics  | 6. 最初と最後の頁<br>240 ~ 254 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子）<br>10.20965/jrm.2023.p0240  | 査読の有無<br>有              |
| オープンアクセス<br>オープンアクセスとしている（また、その予定である）   | 国際共著<br>-               |

〔学会発表〕 計5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>齊藤裕一, 伊藤誠, ボンサトーン・ラクシンチャラーンサク               |
| 2. 発表標題<br>ヒヤリ経験のデータから駆動する 推奨速度ドライバモデルの構築に向けたデータ選別法の探究 |
| 3. 学会等名<br>2022年度自動車技術会秋季大会学術講演会                       |
| 4. 発表年<br>2022年  |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Pongsathorn Raksincharoensak   |
| 2. 発表標題<br>Motion Planning and Control Based on Risk Field for Risk Predictive Driving Assist System Design |
| 3. 学会等名<br>15th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC ' 22) ( 国際学会 )                    |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Yohei Fujinami, Pongsathorn Raksincharoensak   |
| 2. 発表標題<br>Proactive Braking Control Design Based on Risk Assessment at Intersection Right-Turn |
| 3. 学会等名<br>15th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC ' 22) ( 国際学会 )        |
| 4. 発表年<br>2022年   |

|   |
|---|
| 1. 発表者名<br>Yuichi Saito, Fumio Sugaya, Shintaro Inoue, Pongsathorn Raksincharoensak, Hideo Inoue                  |
| 2. 発表標題<br>Context-Sensitive Driver Model for Determining Recommended Speed in Intersection Driving Scenarios     |
| 3. 学会等名<br>6th International Symposium on Future Active Safety Technology Towards Zero-Traffic-Accidents ( 国際学会 ) |
| 4. 発表年<br>2021年   |

|  |
|--|
| 1. 発表者名<br>齋藤 裕一, 菅谷 文男, 井上 慎太郎, Pongsathorn Raksincharoensak, 井上 秀雄 |
| 2. 発表標題<br>見通しの悪い交差点における推奨速度を決定するコンテキストウェアドライバモデルの提案                 |
| 3. 学会等名<br>2021年度自動車技術会学術講演会秋季大会                                     |
| 4. 発表年<br>2021年  |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

|       | 氏名<br>(ローマ字氏名)<br>(研究者番号)                     | 所属研究機関・部局・職<br>(機関番号)                  | 備考 |
|-------|---|--|----|
| 連携研究者 | 齊藤 裕一<br><br>(Saito Yuichi)<br><br>(90770470) | 筑波大学・システム情報系・助教<br><br><br><br>(12102) |    |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関        |         |  |
|---------|----------------|---------|--|
| ドイツ     | ブラウンシュヴァイク工科大学 | 車両工学研究所 |  |